

Tuomas Kuusisto

POMMIKALORIMETRIA PALAMISLÄMPÖJEN
MÄÄRITYKSESSÄ

Kemiantekniikan koulutusohjelma
Kemiantekniikan suuntautumisvaihtoehto
2009

POMMIKALORIMETRIA PALAMISLÄMPÖJEN MÄÄRITYKSESSÄ

Kuusisto Tuomas
Satakunnan ammattikorkeakoulu
Kemiantekniikan koulutusohjelma
Joulukuu 2009
Ohjaaja: lehtori Hannelius, Timo (SAMK)
Sivumäärä: 35
Liitteitä: 1 (6 sivua)

Asiasanat: Palamislämpö, lämpöarvo, pommikalorimetria

Opinnäytetyön aiheena oli tutkia pommikalorimetrillä erilaisten polttoaineiden palamislämpöjä ja verrata niitä kirjallisuuden tunnettuihin arvoihin.

Kokeellisessa osassa käytettiin Satakunnan Ammattikorkeakoulun kemianlaboratoriossa olevaa IKA C-200 pommikalorimetriä. Kalorimetri kalibroitiin ennen määrittystä. Jokaisesta tutkitusta aineesta tehtiin kolme määrittystä.

Teoriaosassa käsiteltiin palamista yleisesti. Myös kalorimetrinen ja tehollinen palamislämpö selvitettiin. Tarkasteltiin myös erilaisia yleisesti käytössä olevia polttoaineita, joiden palamislämpöjä mitattiin työn kokeellisessa osassa.

Mittaukset onnistuivat hyvin, ja näytteiden palamislämmöt vastasivat hyvin kirjallisuuden arvoja. Puun kuiva-ainepitoisuuden nousu kasvatti puun lämpöarvoa lähes lineaarisesti. Erityisen korkea lämpöarvo saatiin kokeissa koivuntuohelle, hieman yli 33 MJ/kg, kun vastaavasti täysin kuivan puun lämpöarvoksi laskettiin noin 20 MJ/kg.

DETERMINATION OF THE HEAT OF COMBUSTION WITH BOMB CALORIMETER

Kuusisto, Tuomas

Satakunta University of Applied Sciences

Degree Programme in Chemical Engineering

December 2009

Supervisor: Hannelius, Timo (M.Sc., Chem.Eng., Senior Lecturer)

Number of pages: 35

Appendices: 1 (6 pages)

Key words: Heat Value, Heat of Combustion, Bomb Calorimetry

The purpose of this thesis was to determine heat values of different fuels by using bomb calorimeter. Experimental results were compared with literature values.

Experimental part was done in the Satakunta University chemistry laboratory. Used equipment was IKA C-200 bomb calorimeter. The calorimeter was calibrated before starting actual tests. Three samples were used in tests from each determined substances.

In the theoretical part the heat of combustion, or heat value, was explained generally. Calorimetric and effective heat values were defined and some calculations were made. The most important technical fuels were presented in theoretical part. Some of these fuels were also used in the experiments.

The measurements succeeded well, and the heat values corresponded well the literature values. The heat value of the wood sample increased almost linearly with dry content.. Especially, the heat value of birch bark was very high, over 33 MJ/kg, when the corresponding calculated value for absolutely dry wood was only about 20 MJ/kg.

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	5
2	TEORIA	6
2.1	Palaminen.....	6
2.2	Palamislämpö.....	7
2.2.1	Kalorimetrinen palamislämpö	7
2.2.2	Tehollinen palamislämpö	8
2.2.3	Teoreettinen palamislämpö	10
2.3	Määritykset	11
3	POLTTOAINEET	14
3.1	Biodiesel	15
3.2	Puu	15
3.3	Mäntyöljy.....	16
3.4	Turve	17
3.5	Öljytuotteet	18
4	POMMIKALORIMETRIA	20
4.1	IKA C-200 Pommikalorimetri	23
5	KOKEELLINEN OSA	25
5.1	Koejärjestelyt.....	25
5.1.1	Pommikalorimetrin rakenne ja käyttö	25
6	TULOKSET	30
6.1	Tulosten tarkastelu.....	32
6.2	Virhearviointi.....	33
7	LÄHTEET	34
LIITTEET		
LIITE 1: MITTAUSPÖYTÄKIRJA		

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia pommikalorimetrian ja pommikalorimetrin käyttöä palamislämpöjen määrittämisessä. Saatuja tuloksia tuli vertailla tunnettuihin kirjallisuusarvoihin tutkituista aineista.

Työ suoritettiin Satakunnan Ammattikorkeakoulun kemiantekniikan laboratoriossa, jossa käytettiin IKA C200- pommikalorimetriä. Ennen varsinaisia mittauksia laite kalibroitiin laitteen käyttöohjeiden mukaan bentsoehapolla kahteen kertaan, jolloin saatiin mittauksissa tarvittava kalibrointiarvo määritettyä.

Kokeessa tutkittavia aineita oli erittäin paljon, joista osaa käytetään yleisestikin polttoaineina, mutta myös hieman epätavallisempia polttoaineita tutkittiin.

Mittaukset suoritettiin yksi aine kerrallaan ja jokaisesta aineesta ajettiin kolme näytettä, joiden keskiarvo merkittiin tuloksiin.

2 TEORIA

2.1 Palaminen

Arkipäiväisessä puheessa palamisella tarkoitetaan usein jonkin aineen, esimerkiksi puun, palamista selvästi näkyvin liekein. Tarkemmin sanottuna palamisessa polttoaineen sisältämät alkuaineet reagoivat ympäröivässä ilmassa olevan hapen kanssa, jolloin polttoaineen kemiallinen potentiaalienergia muuttuu lämpöenergiaksi.

Palaminen edellyttää neljää asiaa:

- syttyvää ainetta
- riittävän korkeaa lämpötilaa
- riittävästi happea
- esteetöntä ketjureaktiota.

Jos jokin näistä edellytyksistä jää täyttymättä, palaminen on mahdotonta.

Palaminen etenee ketjureaktiona, jossa syntyy ensin vapaita radikaaleja. Syntyneet vapaat radikaalit katkovat polttoaineen molekyylien kovalenttisia sidoksia, muodostaen lisää vapaita radikaaleja.

Palaminen voi olla myös liekitöntä, eli niin kutsuttua hidasta palamista. Sen lisäksi, että hitaassa palamisessa ei esiinny liekkejä, ei lämpötila myöskään nouse korkeaksi. Esimerkkejä hitaasta palamisesta on hengitys ja lahoaminen, eli orgaanisen aineksen biologinen hajoaminen.

Kemiallisena reaktiona palaminen on siis yksinkertaisimmillaan aineen reaktiota hapen kanssa. Yksinkertaisin esimerkki on hiilen palaminen reaktioyhtälön (1) mukaisesti:



2.2 Palamislämpö

Palamislämpö (ΔQ_C), joka tunnetaan myös toisella nimellä lämpöarvona, kertoo kuinka paljon tietty massa jotain tunnettua ainetta vapauttaa lämpöenergiaa massayksikköä kohden palaessaan täydellisesti. Palamislämpö ilmoitetaan useimmiten kiinteillä ja nestemäisillä aineilla megajouleina polttoainekiloa kohti, MJ/kg. Kaasumaisille polttoaineille käytetään massayksikön tilalla tilavuusyksikköä, kuutiometriä. Näin kaasumaisille polttoaineille saadaan yksiköksi MJ/m³.

Palamislämpö ilmoitetaan joko kalorimetrisena lämpöarvona ($\Delta Q_{C,CAL}$), tehollisena lämpöarvona ($\Delta Q_{C,EFF}$) tai tehollisena lämpöarvona saapumistilassa (toimituskosteus). Kalorimetrisessä lämpöarvossa oletetaan palamisessa muodostuvan vesihöyryn kondensoituvan nesteeksi, kun taas tehollisessa lämpöarvossa oletetaan että kaikki vesi jää höyrytilaan palamisen jälkeen. Tämän takia kalorimetrinen lämpöarvo on veden höyrystymiseen vaadittavan energiamäärän verran suurempi kuin tehollinen lämpöarvo. Kaikista pienin lämpöarvo on tehollisella lämpöarvolla toimituskosteudessa, sillä siinä lämpöarvoa laskettaessa otetaan huomioon energiamäärä joka kuluu sekä polttoaineen sisältämän että palamisessa syntyvän veden haihduttamiseen.

Palamislämmön määrittäminen tapahtuu polttamalla tunnettu määrä polttoainetta suljetussa astiassa, jossa on ylimäärin puhdasta happea. Palamisreaktiossa vapautuva lämpöenergian määrä siirtyy astiaa ympäröivään veteen, jonka lämpötila nousee. Tätä lämpötilan muutosta mittaamalla voidaan määrittää siirtyneen, eli reaktiossa syntyneen lämpöenergian määrä ja näin ollen tutkittavan aineen luovuttama lämpömäärä eli palamislämpö. Palamislämpö määritetään yleensä kuivatuilla tai tasapainokosteudessa olevilla näytteillä.

2.2.1 Kalorimetrinen palamislämpö

Kalorimetrinen palamislämpö tarkoittaa lämpöenergian määrää, joka vapautuu, kun 1 kg polttoainetta palaa täydellisesti ja palamisessa syntyneet palamistuotteet, eli savukaasut, jäähtyvät 25 °C:een lämpötilaan. Analyysinäyte, jota ei ole kuivattu, polte-

taan pommikalorimetrissä happipitoisessa pommissa ja palamisessa syntyvä lämpö mitataan. Näytteelle määritetään myös kosteusprosentti, jonka avulla poltetun näytteen palamislämpö muutetaan, jotta se vastaisi täysin kuivan aineen palamislämpöä. Täysin kuivan aineen palamislämpö on siis kalorimetrinen palamislämpö ja se voidaan laskea kaavan (2) mukaisesti. /3, s. 30/

$$Q_{KP} = Q_{C,CAL} * \frac{100}{100 - M_{IK}} \quad (2)$$

Jossa Q_{KP} = täysin kuivan aineen kalorimetrinen palamislämpö, MJ/kg

$Q_{C,CAL}$ = ilmakehän näytteen palamislämpö, MJ/kg

M_{IK} = ilmakehän näytteen kosteusprosentti, %.

Laskuesimerkkinä on 7 vuorokautta kuivuneen puun kalorimetrinen palamislämpö. Näytteen kosteusprosentti oli 7,1 % ja palamislämpöjen keskiarvo 18,71 MJ/kg. Arvot ovat sijoitettuna kaavaan (2).

$$Q_{KP} = 18,71 \frac{MJ}{kg} * \frac{100}{100 - 7,1} = 20,1 \frac{MJ}{kg}$$

2.2.2 Tehollinen palamislämpö

Tehollinen palamislämpö absoluuttisen kuivalle polttoaineelle saadaan vastaavasta kalorimetrisestä palamislämmöstä kaavan (3) mukaan. /3, s.31/

$$Q_{C,EFF} = Q_{KP} - 0,02441 * M \quad (3)$$

Jossa $Q_{C,EFF}$ = absoluuttisen kuivan aineen tehollinen palamislämpö, MJ/kg

Q_{KP} = täysin kuivan näytteen kalorimetrinen palamislämpö, MJ/kg

0,02441 = veden höyrystymislämmöstä johtuva korjauskerroin (25 °C)

M = polttoaineen kuiva-aineen sisältämän vedyn palaessa syntynyt vesimäärä, %

Laskuesimerkkinä lasketaan puupelletin kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo, pelletin kosteuden ollessa 4,4 % ja vetytitoisuuden kuiva-aineessa ollessa 6,0 % ja punnitun näytteen massa 0,5076 g.

Kosteuspitoisuuden ja vedyn pitoisuuden kuiva-aineessa avulla lasketaan vedyn massa kuiva-aineessa

$$(0,5076 \text{ g} - (0,5076 \text{ g} * 0,044)) * 0,06 = 0,0291 \text{ g}$$

Vedyn ja hapen reaktioyhtälöstä saadaan syntyvän veden määrä.



Reaktioyhtälöstä saadaan kertoimet, joiden mukaan happea kuluu reaktiossa puolet vedyn ainemäärästä.

$$n(\text{H}_2) = \frac{m}{M} = \frac{0,0291 \text{ g}}{2,016 \text{ g}} \text{ mol} = 0,01444 \text{ mol}$$

$$n(\text{O}_2) = \frac{1}{2} * n(\text{H}_2) = 0,00722 \text{ mol}$$

Hapen ylimäärän takia reaktiotuotteen ainemäärä lasketaan ensin kuluvan lähtöaineen, tässä tapauksessa vedyn, mukaan. Reaktioyhtälön mukaan tuotteen moolimäärä on sama kuin vedyn. Lasketaan tuotteen, eli veden massa

$$n(\text{H}_2\text{O}) = n(\text{H}_2) = 0,01444 \text{ mol}$$

$$m(\text{H}_2\text{O}) = n * M = 0,01444 \text{ mol} * 18,016 \text{ g/mol} = 0,2602 \text{ g}$$

Nyt saadaan laskettua prosentteina vedyn palaessa syntyneen veden määrä kuiva-aineen osuudesta.

$$(0,2602 \text{ g} : (0,5076 \text{ g} * 0,956)) * 100 \% = 53,6 \%$$

Kun tämä prosenttiluku sijoitetaan M:n kohdalle kaavaan (3) saadaan:

$$Q_{C,EFF} = 20,13 \frac{MJ}{kg} - 0,02441 * 53,6 = 18,8 \frac{MJ}{kg}$$

2.2.3 Teoreettinen palamislämpö

Puhtaille orgaanisille yhdisteille voidaan määrittää palamislämpö täysin matemaattisesti standardisten muodostumisentalpioiden (ΔH_f^\square) avulla. Standardinen muodostumisentalpia tarkoittaa energiaa, joka vaaditaan yhden moolin orgaanista yhdistettä syntymiseksi alkuaineistaan. Vapailla alkuaineilla (palamisreaktiossa yleensä happi) standardimuodostumisentalpia on nolla, joten laskuissa otetaan huomioon vain kemialliset yhdisteet. Orgaanisten yhdisteiden palamisreaktioissa on aina tuotteina neste-mäistä vettä ja kaasumaista hiilidioksidia. Jos yhdisteessä on jotain muita alkuaineita, kuten typpeä, klooria tai rikkiä, ne ovat palamistuotteissa oksideina. Standardimuodostumisentalpiat ovat yleensä negatiivisia, eli lämpöä vapautuu, eli reaktiot ovat eksotermisiä.

Laskuissa lasketaan ensin palamisreaktion moolinen reaktioentalpia (ΔH_R) kaavan (5) mukaan.

$$\Delta H_{m,R} = \sum_{i=1}^N v_i \Delta H_{f,i}^\square \quad (5)$$

jossa, $v_i > 0$ = tuotteet

$v_i < 0$ = lähtöaineet

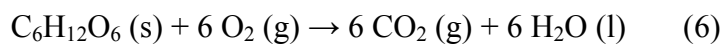
Kaava (5) on esitettyä selkeämmin kaavassa (5.1)

$$\Delta H_R = \sum \Delta H_f^\square (\text{Tuotteet}) - \sum \Delta H_f^\square (\text{Lähtöaineet}) \quad (5.1)$$

Kaavassa (5.1) tulee huomioida stoikiometriset kertoimet tuotteiden ja lähtöaineiden lämpösisältöjen summissa.

Moolinen reaktiolämpö voidaan tämän jälkeen muuttaa palamislämmöksi massayksikköä (ΔH_C) kohden jakamalla reaktiolämpö lähtöaineen moolimassalla, näin saadaan yksiköksi kJ/g

Laskuesimerkkinä on glukoosin palamisreaktio (6).



Standardimuodostumisentalpiat:

Glukoosi = -1276 kJ/mol , Moolimassa : 180 g/mol

Happi = 0 kJ/mol

Hiilidioksidi = -393,4 kJ/mol

Vesi = -285,2 kJ/mol

$$\Delta H_R = 6 * \Delta H_f^\square(\text{CO}_2) + 6 * \Delta H_f^\square(\text{H}_2\text{O}) - \Delta H_f^\square(\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6)$$

$$\Delta H_R = 6 * (-393 \text{ kJ/mol}) + 6 * (-285 \text{ kJ/mol}) - (-1276 \text{ kJ/mol})$$

$$\Delta H_R = -2792 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta H_C = \frac{2792 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}}{180 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} = 15,511 \text{ kJ/g} = 15,51 \text{ MJ/kg}$$

2.3 Määritykset

Standardin CEN/TS 14774 mukainen kosteuden määrittäminen tapahtuu kuivaamalla poltettava näyte uunissa 105 °C:n lämpötilassa ja normaalissa ilmakehän paineessa. Kuivausta jatketaan niin kauan, ettei näytteen ja näyteastian massa enää muutu mihinkään. Tämän jälkeen kosteusprosentti voidaan laskea kaavan (7) mukaan näytteen massan pienenemisestä.

$$M = \left(1 - \left(\frac{m_{f_k}}{m_{s_k}} \right) \right) * 100 \% \quad (7)$$

Jossa m_{ek} = näytteen massa ennen kuivausta.
 m_{jk} = näytteen massa kuivauksen jälkeen.
 M = näytteen kosteusprosentti

Esimerkkinä määritetään tuoreen puun kosteuspitoisuus, jossa näytteen massa ennen kuivausta oli 18,3025 g ja kuivauksen jälkeen 8,4413 g.

Kosteusprosentiksi kaavan (7) mukaan tuli tällöin :

$$M = \left(1 - \left(\frac{8,4413 \text{ g}}{18,3025 \text{ g}} \right) \right) * 100\% = 53,9\%$$

Kaikkien kiinteiden aineiden kosteusprosentit on esitetty Taulukko 2:ssa sivulla 29.

Näytteiden tuhkapitoisuudet määritettiin punnitsemalla palamisastia polton jälkeen, jolloin saatiin selville kuinka paljon näytteestä oli jäänyt palamatta. Palamattoman aineen massa laskettiin kaavan (8) mukaan.

$$m_p = m_n - (m_{ep} - m_{jp}) \quad (8)$$

Jossa m_p = palamattoman aineen massa, g
 m_n = näytteen massa, g
 m_{ep} = palamisastian + näytteen massa ennen polttoa, g
 m_{jp} = palamisastian massa polton jälkeen, g.

Tämän jälkeen voidaan laskea näytteen palamattoman aineen pitoisuus eli tuhkapitoisuus prosentteina kaavan (9) mukaan.

$$Y = \frac{m_p}{m_n} * 100\% \quad (9)$$

Jossa m_p = palamattoman aineen massa
 m_n = poltetun näytteen massa.
 Y = näytteen tuhkapitoisuus.

Esimerkkinä määritettiin aktiivihiilen tuhkapitoisuus näytteessä jonka massa ennen polttoa oli 0,5003 g, palamisastian + näytteen massa ennen polttoa oli 10,2939 g ja palamisastian massa polton jälkeen oli 9,813 g.

Palamattoman aineen massaksi kaavan (8) mukaan tuli tällöin:

$$0,5003 \text{ g} - (10,2939 \text{ g} - 9,813 \text{ g}) = 0,0194 \text{ g}$$

Tuhkapitoisuudeksi saatiin kaavan (9) mukaan:

$$\frac{0,0194}{0,5003} * 100\% = 3,9\%$$

Kaikkien aineiden tuhkapitoisuudet on esitetty liitteessä 1 jossa on jokaisen aineen mittauspöytäkirjat.

3 POLTTOAINEET

Suomen pohjoinen sijainti, korkea elintaso ja korkea teollistuminen ovat syynä siihen, että energiankulutus henkeä kohti on huomattavasti suurempi kuin monissa muissa maissa. Suurin osa, jopa 70 % /13, s.111/, Suomessa tarvittavasta energiasta tuotetaan polttamalla erilaisia polttoaineita. Tässä yhteydessä polttoaineilla tarkoitetaan niin sanottuja perinteisiä polttoaineita, ydinpolttoaineet jäävät käsittelyn ulkopuolelle. Perinteiset polttoaineet voivat olla kiinteitä, kaasumaisia tai nestemäisiä. Polttoaineina käytetään sekä uusiutuvia että uusiutumattomia luonnonvaroja. Uusiutuvia luonnonvaroja on esimerkiksi puu ja vain vähän käytetty olki. Uusiutumattomia ovat kaikki fossiiliset polttoaineet, jotka ovat syntyneet kasvi- ja eläinperäisistä jätteistä hapettomissa olosuhteissa hyvin pitkän ajan kuluessa. Fossiilisia polttoaineita ovat esimerkiksi maakaasu, maaöljy ja kivihiili.

Kaikki perinteiset polttoaineet sisältävät hiiltä ja vetyä, jotka ovat useimmiten kemiallisina yhdisteinä, myös muita alkuaineita voi olla pieniä määriä riippuen polttoaineesta. Fossiilisissa polttoaineissa on usein myös typpeä ja rikkiä, mutta ei juurikaan happea. Uusiutuvat polttoaineet sen sijaan sisältävät aina jonkin verran happea.

Tässä kappaleessa kerrotaan hieman yleisimmistä polttoaineista ja niiden käyttötarkoituksista, käyttökohteista ja monimuotoisuuksista. Kokeellisessa osassa oli myös mukana jokaista näitä aineita joita kappaleessa käsitellään.

Taulukko 1 Tunnettujen polttoaineiden yleisiä palamislämpöjä.

Biodiesel	40 MJ/kg
Puu	18,8 MJ/kg
Mäntyöljy	39 MJ/kg
Turve	13 MJ/kg
Bensiini	43 MJ/kg

Kevyt polttoöljy	42,7 MJ/kg
Raskas polttoöljy	40,6 MJ/kg

3.1 Biodiesel

Biodiesel on yleisnimitys kasviöljypohjaiselle dieselpolttoaineelle. Öljykasvien, kuten rypsi tai rapsi, siemenistä erotettu öljy ei sovellu sellaisenaan nykyisten dieselmoottorien polttoaineeksi karstoittumisongelmien vuoksi. Tämän takia kasviöljyt esteröidään alkoholeilla, jotta niistä saataisiin normaaleihin dieselmoottoreihin sopivaa polttoainetta.

Euroopassa biodieseleistä käytetään eniten rypsiöljystä ja metanolista valmistettua esterää, RME:tä (rypsimetyyliesteri). Toinen vaihtoehto RME:lle on REE (rypsietyyliesteri), joka valmistetaan rypsiöljystä ja etanolista.

Neste Oil on aloittanut oman tuotannon biodieselille, joka kulkee nimellä Neste Green- diesel. Neste Green- diesel sisältää vähintään 10 % uusiutuvista raaka-aineista valmistettua NexBTL- dieseliä (Neste Biomass to Liquid). NexBTL:n pääraaka-aineena on palmuöljy, jota tuodaan Indonesiasta ja Malesiasta. Toiset pääaineet ovat rypsiöljy ja teurasjätteistä valmistettu rasva. Nesteen biodieselin setaaniluku on korkeampi kuin normaalissa diesel- polttoaineessa, joten auton kylmäkäynnistys onnistuu helpommin ja taloudellisemmin. /5/

3.2 Puu

Puu on luonnonmukaisista polttoaineista nopeimmiten uusiutuvaa ja sitä käytetäänkin erittäin monissa käyttötarkoituksissa. Suurin hyöty puun käyttämisessä polttoaineena on sen monimuotoisuus. Puusta voidaan tehdä helposti tiettyyn tarpeeseen sopivaa polttoainetta. Yleisnimityksenä kaikille puu- ja kuoriaineksesta peräisin oleville polttoaineille sisältäen metsäteollisuuden puutähteet ja mustalipeän käytetään puuperäiset polttoaineet. Tunnetuimpia puuperäisiä polttoaineita ovat puubriketit, puu-

pelletit, hake, viherhake, halot, ja puuhiili. Lisäksi voimalaitokset ovat kasvavassa määrin alkaneet käyttää hakkuutähdettä polttoaineena.

Puubrikitit valmistetaan kuivasta purusta, hiontapölystä ja lastuista puristamalla. Puun omat sideaineet pitävät brikitit kasassa, joten ylimääräisiä sideaineita ei yleensä tarvita. Brikitit ovat yleensä poikkileikkaukseltaan pyöreitä tai neliön muotoisia ja niiden läpimitta on yleensä noin 50–80 mm.

Puupelletit valmistetaan sahanpuruista ja lastuista puristamalla. Pelletit ovat pieniä, noin 8–12 mm paksuja ja 10–30 mm pitkiä. Pellettien muoto vaihtelee sylinterimäisestä pyöreään ja neliön muotoiseen.

Haketta valmistetaan hakettamalla puuta pieneksi hakkeeksi, jota on helppo käsitellä ja käyttää tarvittaviin käyttötarkoituksiin. Viherhake on tuoreesta hakkuutähteestä tai puusta tehtyä polttohaketta jossa on lehdet ja neulaset mukana.

Puuhiili on orgaanista hiiltä, joka valmistetaan pyrolyysin avulla. Pyrolyysi tarkoittaa kuumentamista ilmattomassa tilassa. Puuhiili on haurasta, huokoista materiaalia, jolla on puun alkuperäinen rakenne ja kasvisolurakenne.



Kuva 1: Puiset polttoaineet vasemmalta oikealle, brikitti, pelletti, hake ja puuhiili.

3.3 Mäntyöljy

Mäntyöljy on sulfaattisellutehtailla tapahtuvan sellunkeiton sivutuote. Mäntyöljy on pääosin saippuoituneesta uuteaineksesta ns. raakasuvasta rikkihapponeutraloinnilla saatua tuotetta.. Raakamäntyöljyä (CTO) voidaan tislata jotta saadaan mäntyrasvahappoa, mäntyhartsia, mäntypikeä, esiöljyä ja tislattua mäntyöljyä.

Poltossa mäntyöljy voidaan laskea biopolttoaineeksi, joka on erittäin ympäristöystävällistä, sillä se on täysin luonnon omista aineista syntynyttä tuotetta. Sitä poltetaan sellutehtailla soodakattilassa jäteliemen mukana merkittäviä määriä.

3.4 Turve

Turvetta syntyy suoalueilla kun suokasvit maatuvat todella hitaasti ja epätäydellisesti. Nämä eloperäiset jätteet jäävät siis kosteisiin olosuhteisiin kerrostumiksi kun uutta kasvustoa kasvaa niiden päälle. Hapen puutteen ja runsaan veden ja kosteuden takia kasvin jäänteet eivät hajoa kunnolla, ja näin syntyy jatkuvasti kasvava turvekerrostuma. Turve on erittäin hitaasti uusiutuva luonnonvarainen polttoaine, jota ei voida lokeroida tarkasti fossiilisten tai uusiutuvien polttoaineiden luokkaan. Suomessa turve on luokiteltu hitaasti uusiutuvaksi biopolttoaineeksi.

Turvetta käytetään voimalaitosten ja kiinteistöjen lämmityskattiloiden polttoaineena. Turve määritellään tuotantotavan mukaan joko jyrsin- tai palaturpeeksi.

Jyrsinturve on polttoturvetta, joka on tuotettu jyrsimällä turvetta suon pinnasta ja kuivaamalla se. Jyrsinturve on raekooltaan epähomogeenistä ja se sisältää pääosin pölymäistä turvetta ja erikokoisia turverakeita. Turveaineksen lisäksi jyrsinturve voi sisältää maatumattomia tai huonosti maatuneita kasvinosia, puun osia ja epäpuhtauksia. Jyrsinturpeen toimituskosteus on yleensä noin 46 %. /3 s.89/

Palaturve on turvekentästä irrotettu, muokattu ja tiivistetty joko sylinterin tai laineen muotoinen pala turvetta joka kuivatetaan tuotantokentällä. Palaturvetta käytetään voimalaitoksissa, lämpölaitoksissa, kiinteistöjen lämmityskattiloissa, mautiloilla, kasvihuoneissa ja omakotitaloissa lämmityspolttoaineena. Palaturpeen toimituskosteus on noin 40 %. /3 s.89/



Kuva 2: Jyrsinturve (vas.) ja palaturve (oik.). /9/

3.5 Öljytuotteet

Yleinen käsitys on että maaöljy, tunnetummalta nimeltään raakaöljy, on muodostunut elollisesta luonnosta peräisin olevista yhdisteistä geokemiallisissa prosesseissa. Raakaöljy on monien erilaisten hiilivety-yhdisteiden seos, joka sisältää lisäksi erittäin pieniä määriä happi-, rikki- ja typpipitoisia yhdisteitä. Pääasiassa raakaöljy koostuu kin aromaattisista, parafiinisista ja nafteenisista hiilivedyistä. Näiden suhteellinen osuus vaihtelee huomattavasti riippuen siitä mistä maailman kolkasta öljy on pumpattu. Kaiken kaikkiaan raakaöljyssä voi olla jopa useita tuhansia erilaisia yhdisteitä, joissa hiiliatomien lukumäärä vaihtelee yhdestä jopa yli kahteensataan vastaten yhdisteitä metaanista asfalteeneihin asti. Raakaöljy sisältää myös pieniä määriä eräitä metalleja, jotka ovat sitoutuneena metalliorgaanisissa yhdisteissä. Tällaisia metalleja ovat esimerkiksi vanadiini ja nikkeli. Rikin ohella niillä on erittäin tärkeä merkitys raakaöljyn laatuun vaikka niiden määrä onkin yleensä suhteellisen vähäinen. Kemiallisesti sitoutuneiden, epäpuhtauksiksi katsottavien alkuaineiden ohella on kaikissa öljyissä fysikaalisesti sekoittuneena epäorgaanisia suoloja, vettä ja sedimenttejä, esimerkiksi hiekkaa, jotka ovat peräisin joko öljykentästä tai tulleet öljyyn kuljetusten aikana.

Raakaöljyn jalostuksella tarkoitetaan raakaöljyn jakamista eri jakeisiin ja jakeiden fysikaalista ja kemiallista käsittelyä niin, että saadaan kaupallisia öljytuotteita. Fysikaalisista menetelmistä eli yksikköoperaatioista tärkein on tislauk. Kemiallisia keinoja eli yksikköprosesseja ovat krakkaus, alkylointi, polymerointi, reformointi ja vetykäsittely.

Useimmat öljynjalostuksen tuotteet valmistetaan sekoittamalla eri prosessiyksiköiden tuottamia hiilivetykomponentteja ja mahdollisia lisäaineita keskenään. Lisäaineiden tarkoitus on parantaa tuotteen laatua tai tehdä tuote helpommin tunnistettavaksi. Tärkeimpiä öljyalan polttoaineita ovat nestekaasu, erilaiset bensiinit, petrolit, dieselöljy sekä kevyt ja raskas polttoöljy.

Nestekaasu on ravintoloissa, teollisuudessa, rakennustyömailla, kasvihuoneissa, trukeissa ja niinkin arkisissa asioissa kuin ruoanlaitossa, grillauksessa, veneissä, matkailuautoissa ja –vaunuissa käytetty polttoaine. Nestekaasu on erittäin hyvä energianlähde, sillä sen energiasisältö ja palamislämpötila ovat todella korkeita. Yleisin nestekaasu sisältää 98 % propaania (C_3H_8) ja 2 % butaania (C_4H_{10}).

Bensiinit ovat satojen eri hiilivetyjen seoksia, joita käytetään pääasiassa autojen, mutta myös työkalujen polttoaineena.

Petroli on väritön tai bensiinin värinen erittäin herkästi syttyvä neste. Petrolit valmistetaan tislaamalla raakaöljystä 135-290 °C:ssa. Petrolit on jaoteltu kolmeen pääasialliseen ryhmään riippuen käyttökohteista, lentopetrolit, valopetrolit ja lämmityspetrolit. Lentopetrolia käytetään lentokoneissa olevien suihkumoottoreiden polttoaineena ja se on erittäin tarkasti jalostettua, jotta sen jäätymispiste olisi alempi, palaminen parempaa ja vesipitoisuus mahdollisimman pieni. Valopetroli on myöskin erittäin pitkälle jalostettua palamisen tehostamiseksi. Valopetrolia käytetään öljylampuissa, voimavalolyhdyissä, retkikeittimissä ja valopetrolilämmittimissä. Lämmityspetrolia käytetään lähinnä polttoaineena lämmityslaitteille, joissa on savunpoistoon tarkoitettu hormi liitettynä, sillä se on likaisempaa kuin valopetroli ja näin ollen päästää enemmän nokea ympäristöön palaessaan.

Dieselöljy on pidemmälle jalostettua kevyttä polttoöljyä jotta sen päästöt olisivat pienempiä. Dieselöljy on tarkoitettu dieselmoottoreiden polttoaineeksi.

Polttoöljy on raakaöljystä jalostettu, pääasiassa lämmitykseen sekä dieselmoottoreiden ja höyrykoneiden polttoaineena käytetty, polttoaine. Polttoöljyä poltetaan erilaisissa polttimissa, kattiloissa, uuneissa ja moottoreissa. Polttoöljyt on usein jaoteltu

kahteen luokkaan, kevyeen ja raskaaseen polttoöljyyn. Kevyttä polttoöljyä käytetään lähinnä talojen lämmitykseen öljypolttimissa polttamalla ja dieselmoottoareiden polttoaineena tieliikenteessä. Raskasta polttoöljyä käytetään suurissa lämpövoimaloissa ja suurissa laivoissa.

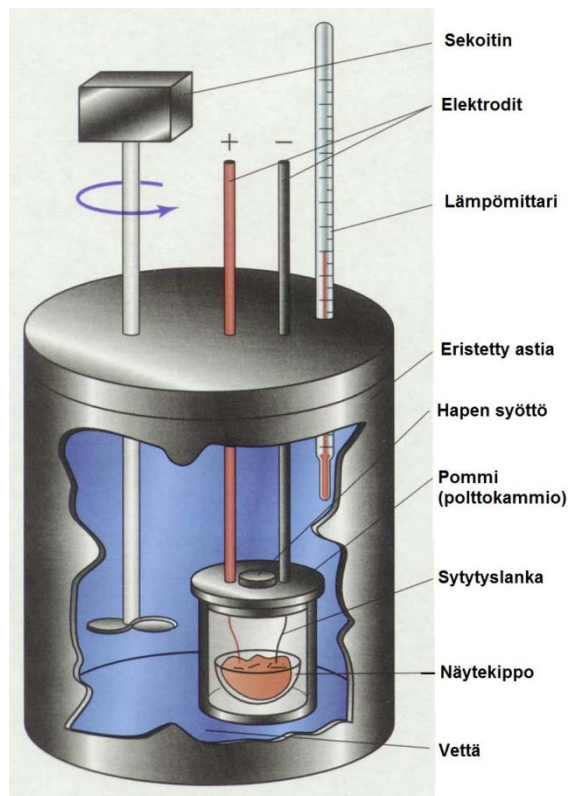
4 POMMIKALORIMETRIA

Pommikalorimetri on laite, jota käytetään eri aineiden palamislämpöjen määrittämiseen. Pommikalorimetrissa poltettava aine palaa vakiotilavuudessa ja luovuttaa lämpöenergiaa palamisastian ympärillä olevaan väliaineeseen, joka on yleensä vesi. Vedden lämpötilan muutoksesta voidaan laskea palamislämpö poltetulle aineelle massayksikköä kohti.

Pommikalorimetrissa poltetaan näytettä, joka tuottaa enintään noin 30 kJ lämpöenergiaa puhtaalla hapella paineistetussa metallisessa polttokammiossa. Happea syötetään kammioon kunnes siellä on noin 30 bar:n ylipaine, jotta palaminen tapahtuisi mahdollisimman täydellisesti, eli kaikki poltettava aine palaisi kammiossa loppuun. Paine kammion sisällä nousee vielä polton aikana, joten kammion on kestävä jopa 40 bar:n ylipaine. Jos paine polttokammion sisällä nousee yli 40 bar:n, on mahdollista, että kammio ei enää kestä vaan se hajoaa. Tästä syystä laite onkin saanut paha-maineen nimensä pommikalorimetri.

Polttokammio on sijoitettu vesisäiliöön jossa on vettä, jonka lämpötilaa mitataan. Lämpömittari pystyy havaitsemaan jopa 0,001 °C-asteen muutokset. Jotta mittaus olisi luotettava ja koko vesimassan lämpötila sama, on vesisäiliössä oltava myöskin sekoitin.

Polttokammion sisällä on pieni näyteupokas, johon poltettava näyte asetetaan. Näyte sytytetään langan avulla joka kulkee elektrodista näytteeseen. Elektrodien kautta kulkeva sähkövirta sytyttää tekstiililangan, joka edelleen sytyttää varsinaisen näytteen.



Kuva 3: Yksinkertainen pommikalorimetri /8/

Standardissa EN ISO 1716 on listattu pommikalorimetrille ja sen osille seuraavanlaisia laatuvaatimuksia, ohjearvoja ja varoituksia. /12/

Pommi:

- tilavuus = 300 ± 50 ml
- reunuksen vahvuuden tulee olla vähintään 10 % sisähalkaisijasta
- massa = max. 3,25 kg
- kannen ja siihen kuuluvien osien, kuten tiivisteiden, tulee kestää 21 MPa sisäistä painetta

Näiden ehtojen täyttyessä pommi on kyllin kestävä, jotta sen sisällä voidaan polttaa 1 g:n hiilipanoksen enintään 3 MPa:n alkupaineessa. Pommin sisäpinnan tulee kestää kaikki palamisessa syntyvät tuotteet. Myös käytettäessä erittäin rikkiä sisältäviä polttoainetta pommin pitää kestää syöpymistä ja korroosiota, kun happoja poltetaan.

Vaippa:

Vaipan mittojen tulee olla sellaiset, että kun pommi on vaipan sisällä, jää pommin ulkoreunan ja vaipan sisäreunan väliin vähintään 10 mm:n rako. Pommi tulee asettaa vaipan sisäpuolelle siten, että sen tukemiseen käytetään mahdollisimman pientä pinta-alaa, ja tukemiseen käytettävä materiaali on ei-johtavaa. Paras tapa suorittaa tuenta on kolmipistetuenta.

Upokas:

Upokas on yleensä valmistettu metallista, kuten nikkelistä tai ruostumattomasta teräksestä, mutta se voidaan myös valmistaa kvartsista. Upokkaassa on oltava tasainen pohja ja sen sisähalkaisijan tulee olla välillä 15 - 25 mm. Upokkaan korkeus tulee olla välillä 14 - 19 mm. Seinämäpaksuudet tulee olla metallilla 1,0 mm ja kvartsilla 1,5 mm.

Johdinlanka:

Johdinlanka tulee valmistaa puhtaasta raudasta ja sen halkaisijan tulee olla 0,1 mm. Lanka voidaan valmistaa myös muista metalleista, kuten esimerkiksi platinasta, nikkelistä tai kromista, mutta niiltä edellytetään katkeamista omasta jännityksestään, kun syttymispiiri on suljettu ja langan tarkka lämpöarvo tulee tuntea. Kun pommin sisällä käytetään metallista upokasta, johdin ja upokas eivät saa olla kosketuksissa toisiinsa. Tämän takia suositellaan käytettäväksi puuvillalankaa latauksen siirtämiseen johtimesta näytteeseen.

Pommin sisäpuoliset reagenssit:

- tislattu tai ionivaihdettu vesi
- happi korkeassa paineessa, puhtaus > 99,5 %

Poltossa käytettävän hapen tulee olla vapaa muista syttyvistä aineista.

4.1 IKA C-200 Pommikalorimetri

C-200 pommikalorimetri on IKA:n perusmalli pommikalorimetristä, joka on tarkoitettu nestemäisten ja kiinteiden aineiden palamislämpöjen määrittämiseen. C-200 pommikalorimetrissa on neljä erilaista ohjelmaa erilaisten kokeiden tekemiseen. Ohjelmat ovat isoperibolinen, dynaaminen, manuaalinen ja aikaohjelmoitu.



Kuva 4: IKA C-200 pommikalorimetri

Pommikalorimetrin mukana tulleista käyttöohjeista /4, s.6/ saadaan käyttöturvallisuuden kannalta seuraavia tärkeitä tietoja:

- maksimienergia pommin sisällä 40 000 J/g
- maksimi käyttölämpötila 50 °C
- pommiin lisättävän hapen maksimi paine 40 bar.
- maksimikäyttöpaine pommin sisällä 230 bar

Testattaessa tuntemattomia näytteitä, suositellaan pidettäväksi etäisyyttä kalorimetriin, sillä jotkin aineet voivat räjähtää kovan paineen alaisina. Varsinkin jos tuntemattomalle aineelle ei tiedetä suuntaa antavaa energiasisältöä, pommiin voidaan laittaa vahingossa liian suuri määrä ainetta, joka tästä syystä paineen kohotessa liian suureksi saattaa aiheuttaa räjähdysriskin. Happi, jota pommissa käytetään, on erittäin voimakkaasti hapettavaa, joka auttaa aineiden syttymistä räjähdysmäisesti, ja näin ollen se reagoi voimakkaasti helposti syttyvien aineiden kanssa. Nestemäiset polttoaineet,

joilla on matala höyrystymispaine, eivät saa olla suoraan kosketuksessa sytytykseen käytettävään puuvillalankaan. On myös mahdollista, että pommin sisäpinnalle muodostuu testauksen jälkeen myrkyllisiä palamisjäännöksiä kaasun tuhkan tai kondenssin muodossa.

Seuraavien ominaisuuksien omaavat materiaalit voivat aiheuttaa riskin käytettäessä kalorimetria:

- myrkyllinen
- syövyttävä
- räjähtävä
- bakteriologisesti saastunut

Laite saattaa synnyttää pienen magneettikentän, joka voi aiheuttaa häiriöitä esimerkiksi sydämentahdistimelle. /4, s.7/

Pommikalorimetrin tarkoitus on mitata kalorimetrin sisäpuolisen lämpötilan muutoksia. Tästä johtuen sen sijoittamisessa täytyy ottaa huomioon seuraavia asioita: /4, s10/

- tukeva ja tasainen alusta.
- poissa suorasta auringon säteilystä
- poissa patterin tai muun lämpösäteilyn lähteen läheisyydestä
- huonelämpötila normaali
- poissa ikkunan, oven tai ilmastointilaitteen läheisyydestä

5 KOKEELLINEN OSA

5.1 Koejärjestelyt

Kokeet tehtiin Satakunnan ammattikorkeakoulun kemianlaboratoriossa olevalla IKA C-200 pommikalorimetrillä. Ennen varsinaisia kokeita laite kalibroitiin bentsoehapolla. Kalibrointi tehtiin kahteen kertaan polttamalla tunnettu massa bentsoehappoa. Jos kokeessa olisi käytetty useampaa kuin yhtä pommia, olisi jokainen pommi tarvinnut kalibroida erikseen.

Kalibroinnin jälkeen aloitettiin eri aineiden tutkimukset kokeellisessa osassa. Jokaisesta aineesta otettiin kolme mahdollisimman tasaista ja saman painoista näytettä, joista aineen palamislämpö määritettiin pommikalorimetrillä. Tuloksista laskettiin keskiarvo, joka toimii lopullisena tuloksena kokeessa.

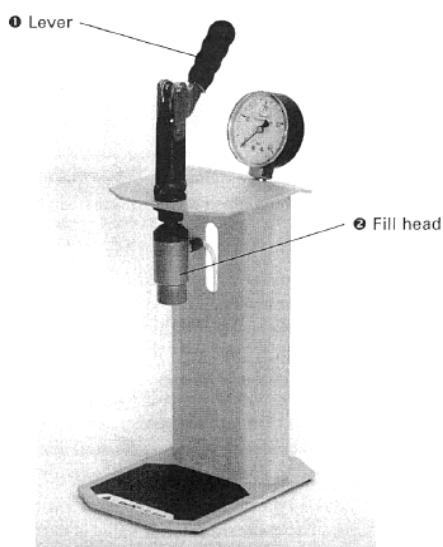
5.1.1 Pommikalorimetrin rakenne ja käyttö

Palamislämmön määrittäminen pommikalorimetrillä ei riipu näytteen olomuodosta, vaan määrittäminen on aina samanlainen. Määrittämistä varten näyte täytyy punnita 0,1 mg:n tarkkuudella, jotta pommikalorimetri antaisi oikean tuloksen kokeen päätyttyä. Näyte asetetaan upokkaaseen, joka sijoitetaan sille tarkoitettuun telineeseen, joka on myös osa pommin kantta ja samalla sytytysadapterin kiinnitysalusta. Kuvassa 5 on esitelty pommin osat. Kun näyte on asetettu upokkaaseen, johdetaan sytyttimenä toimiva puuvillalanka näytteeseen siten, että kontakti langan ja näytteen välillä on mahdollisimman hyvä, jotta näyte syttyisi mahdollisimman hyvin.



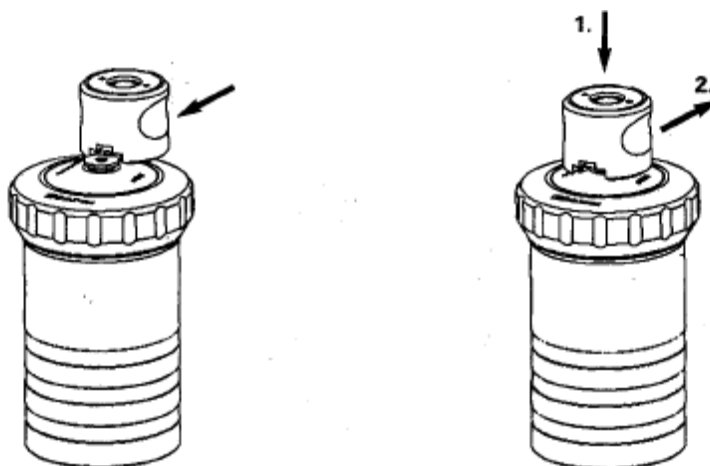
Kuva 5: Pommikalorimetrin polttokammion osat purettuna (vas.) ja koottuna (oik.). Osa 1: Teline ja kansi, 2: Pommi, 3: Pommin kannen tiiviste, 4: Näyteupokas, 5: Sytytysadapteri.

Ennen pommin sulkemista sen pohjalle lisätään 5 ml ionivaihdettua vettä. Ionivaihdetun veden tarkoitus pommin pohjalla on imeä happamia kaasuja, jotta niitä ei pääsisi huoneilmaan kun pommi avataan. Veden määrää pommissa ei tulisi muuttaa kalibroinnissa käytetystä vesimäärästä, sillä sekin voi vaikuttaa ajon lopputulokseen. Kun vesi on mitattu pommin pohjalle, pommi suljetaan ja täytetään hapella. Hapetta syötetään siihen tarkoitetulla laitteella (kuva 6) kunnes paine pommissa on 30 bar.



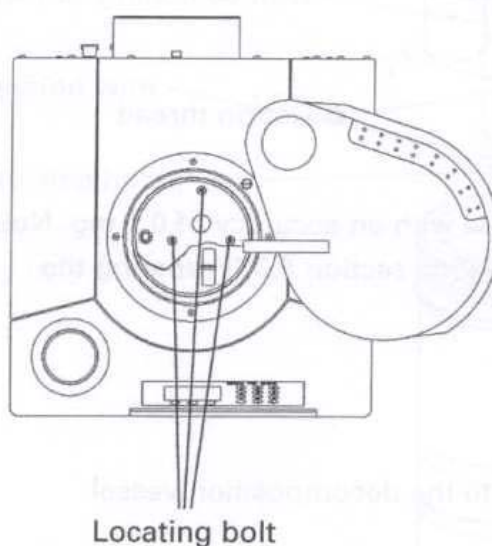
Kuva 6: Pommin hapensyöttölaite. /4/

Kun pommi on paineistettu, liitetään sen päälle sytytysadapteri. Adapterin tarkoitus on johtaa kalorimetrin kannesta tuleva sähkövirta pommin sisälle, ja lankaa pitkin näytteeseen. Tämän takia adapterissa onkin kaksi nystyä, joihin kalorimetrin kannessa olevat johtimet ottavat kiinni, kun kalorimetrin kansi suljetaan.



Kuva 7: Pommin sytytysadapterin kiinnitys ja irrotus. /4/

Kun sytytysadapteri on liitetty pommiin, asetetaan pommi kalorimetrin sisemmän vesisäiliön sisään. Säiliön pohjassa on kolme ohutta metallista tappia, joiden väliin pommi asetetaan (kuva 8). Näin pommi ei osu vesisäiliön seinämiin eikä lämpöä siirry kuin pommia ympäröivään veteen.



Kuva 8: Pommin sijoitus pommikalorimetrin sisälle. /4/

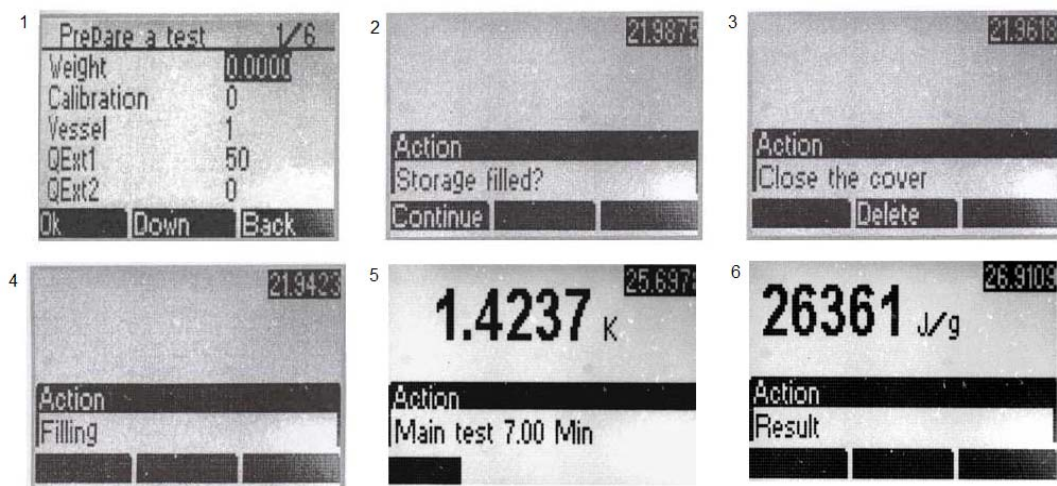
Kun pommi on asetettu kalorimetrin sisään, täytetään ulompi vesisäiliö vedellä ja kytketään kalorimetri päälle. Kalorimetrissa on etupaneeli, jossa on pieni näyttö ja näppäimistö, josta kalorimetrin toimintoja ohjataan (kuva 9).



Kuva 9: IKA C200 pommikalorimetrin näppäinpaneeli ja näyttö. /4/

Pommikalorimetrin päälle kytkennän jälkeen syötetään punnitun näytteen massa kokeen valmisteluruudussa olevaan ”Weight” kohtaan (kuva 10, ruutu 1). Tämän jälkeen painetaan ”Ok”, jotta polttokoe voidaan aloittaa. Tämän jälkeen laite varmistaa, että ulompi vesisäiliö on täytetty vedellä (kuva 10, ruutu 2) ja pyytää sulkemaan pommikalorimetrin kannen (kuva 10, ruutu 3), ellei sitä ole vielä suljettu. Kun kansi on suljettu, laite täyttää sisemmän vesisäiliön ulommassa vesisäiliössä olevalla vedellä (kuva 10 ruutu 4). Kokeen aikana näytöstä voi seurata kokeen vaihetta ja pommia ympäröivän veden lämpötilan muutosta (kuva 10, ruutu 5). Kun koe on päättynyt, ilmoittaa laite tuloksen näytöllä halutussa muodossa (kuva 10, ruutu 6). Kaikissa kokeissa käytettiin isoperibolista ohjelmaa.

Kun koe on päättynyt ja pommikalorimetrin antama tulos kirjattu ylös, avataan laitteen kansi, jolloin laite alkaa automaattisesti tyhjentää sisempää vesisäiliötä. Tyhjennyksen jälkeen laite on valmis uuteen määrittelyyn, jolloin samat toimenpiteet suoritetaan uudestaan.



Kuva 10: Pommikalommetrin näytön kuvia eri vaiheista. /4/

6 TULOKSET

Tässä kappaleessa tarkastellaan työssä saatuja tuloksia ja niiden merkityksiä. Ensimmäisenä tuloksissa on laskettu kosteusprosentit jokaiselle kokeessa käytetylle kiinteälle polttoaineelle. Taulukossa 2 on näytteiden punnitut massat ja niistä lasketut kosteusprosentit.

Taulukko 2 Kokeissa käytettyjen kiinteiden aineiden kosteusprosentit.

Aine	Näytteen massa ennen kuivausta (g)	Näytteen massa kuivauksen jälkeen (g)	Kosteusprosentti
Kopiopaperi	4,6131	4,2464	7,9 %
Aikakauslehden kansi	7,3498	6,715	8,6 %
Puuhake	1,3249	1,2791	3,5 %
Pellavarouhe	6,4513	5,7466	10,9 %
Selluloosa	3,3983	3,2825	3,4 %
Aktiivihiili	5,4536	5,1397	5,8 %
Koivutuohi	5,3901	5,2873	1,9 %
Puupelletti	11,503	10,9983	4,4 %
Glukoosi	3,6843	3,5826	2,8 %
Männyn kuori	7,2443	6,9349	4,3 %
Tuore puu	18,3025	8,4413	53,9 %
24h kuivunut puu	7,3288	5,5187	24,7 %
7 vrk kuivunut puu	5,3514	4,9691	7,1 %
Turve	7,0274	5,263	25,5 %
Puun oksa (kuusi)	2,3971	2,2368	6,6 %

Taulukossa 3 on listattu tutkittujen aineiden palamislämpöjen keskiarvot ja verrattu niitä tunnettuihin kirjallisuusarvoihin. Kaikille aineille ei löytynyt luotettavia kirjallisuusarvoja, joten niiden kohdat on jätetty tyhjiksi taulukossa. Muutenkin arvot vaihtelevat jonkin verran riippuen lähteestä.

Taulukko 3 Näytteiden palamislämmöt ja vertailu kirjallisuusarvoihin

Aine	Palamislämpö MJ/kg		Ero kirjallisuusarvoon MJ/kg
	Mitattu	Kirjallisuusarvo	
Kopiopaperi	12	-	
Aikakauslehden kansi	9,9	12,2 ,/3/	- 2,3
Puuhake	19	18,5 ,/3/	+ 0,5
Pellavarouhe	21,8	20,2	+ 1,6
Selluloosa	16,3	17	- 0,7
Mäntyöljy	39,1	38 ,/3/	+ 1,1
Rypsiöljy	39,2	36,9 ,/3/	+ 2,3
Aktiivihiili	31	32,8	- 1,8
Moottoribensiini (2T)	45,7	43,5 ,/10/	+ 2,2
Etanoli	27,9	26,9 ,/10/	+ 1,0
Glyseroli	17,7	19	- 1,3
Moottoriöljy	44,6	42,3 ,/15/	+ 2,3
Koivutuohi	33,2	29,9	+ 3,3
Puupelletti	18,8	18,9 ,/3/	- 0,1
Glukoosi	15,5	15,5	
Männyn kuori	18,9	19,5 ,/3/	- 0,6
Biodiesel (RME)	40	38,5 ,/3/	+ 1,5
Tuore puu	9,9	10	- 0,1
24h Kuivunut puu	14,7	-	
7 vrk Kuivunut puu	18,7	-	
Turve	12,8	13 ,/3/	- 0,2
Puun oksa (kuusi)	18,9	19,3 ,/3/	- 0,4

Puu oli näytteistä ainoa, jolla voitiin tutkia kosteuden vaikutusta palamislämpöön.

Aiemmin työn teoriaosuudessa määritettiin täysin kuivalle puulle palamislämmöksi 20,1 MJ/kg. Kerrotaan tämä arvo näytteiden kuiva-ainepitoisuudella (1 - M), jolloin saadaan siinä kosteudessa olevan puun arvo. Tutkituista näytteistä tuoreelle puulle, jonka kosteusprosentti oli 53,9, saatiin palamislämmöksi laskemalla 9,3 MJ/kg.

6.1 Tulosten tarkastelu

Kun saatuja tuloksia verrataan tunnettujen polttoaineiden tyypillisiin arvoihin, täytyy ottaa huomioon, että tyypilliset arvot ovat vain otantoja tietyistä eristä polttoainetta. Täten ne eivät ole suoraan verrattavissa pommikalorimetrillä tehtyjen mittausten, ja niissä saatujen tulosten, kanssa. Nämä tyypillisiksi luokitellut palamislämmöt antavatkin vain suuruusluokan, jonka avulla voidaan määrittää pommikalorimetrissä poltettavan näytteen massa.

Koivutuohen antama lämpöarvo oli jokseenkin yllätys, vaikka olikin tiedossa että koivutuohi palaa erittäin hyvin ja kuumalla liekillä. Silti sen palamislämpö oli suurempi kuin ennen koetta osattiin olettaa.

Puun palamislämpöjä tarkasteltaessa huomataan hyvin, että kosteuden muuttuessa puun palamislämpö muuttui suhteessa saman verran. Kosteuden vaikutus palamislämpöön oli hyvin lineaarinen.

Kopiopaperin ja aikakauslehden kannen välisestä erosta voidaan tulkita, että paperiin lisättävät epäorgaaniset täyteaineet ja muut lisäaineet alentavat huomattavasti paperin palamislämpöä.

6.2 Virhearviointi

Tässä työssä inhimillisen virheen vaikutukset jäivät todella pieniksi. Pommikalorimetrin hoitaessa kaikki palamiseen liittyvät toimenpiteet ja laskutoimitukset, jäi käyttäjälle vain näytteen punnitseminen ja massan syöttäminen kalorimetriin.

Joidenkin aineiden kanssa oli oltava tarkkana, sillä massa saattoi muuttua huoneilmassa erittäin nopeasti. Tällaisia aineita olivat esimerkiksi bensiini ja turve. Bensiini höyrystyy nopeasti matalissakin lämpötiloissa ja turve taas sitoo ilmasta herkästi kosteutta itseensä. Tästä syystä näytteitä ei voitu seisottaa odottamassa vuoroaan, vaan laitettiin suoraan vaa'asta pommikalorimetriin. Siltikin pienet massan muutokset voivat olla mahdollisia. Jos massat ehtivät muuttua ennen polttokokeiden aloittamista, olisivat myös kalorimetriset lämpöarvot todellisuudessa hieman erilaiset kuin mitä saatiin. Jos todellinen massa on pienempi kuin mitä laitteeseen syötettiin, on kalorimetrinen palamislämpö tällä näytteellä todellisuudessa suurempi, ja päinvastoin.

7 LÄHTEET

1. Fabricius, Liukkonen, Sundholm. 2006. Fysikaalisen kemian taulukoita. Helsinki. Otatieto. 104 s. ISBN 951-672-183-4.
2. Hannelius, T. 2007. Fysikaalisen kemian opintojakso. Luentomonisteet ja muistiinpanot. Satakunnan Ammattikorkeakoulu.
3. Alakangas, E. 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Verkojulkaisu. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Espoo. 196 s. (VTT Tiedotteita 2045). Saatavissa: <http://www.motiva.fi/files/685/t2045.pdf>
4. IKA. Calorimeter system C 200. Operating instructions. 2005. Staufen. 43 s.
5. Neste Oil Oy. 2009. Neste Green- diesel. Verkojulkaisu. Saatavissa: <http://www.neste.fi/artikkeli.aspx?path=2589%2c2655%2c2698%2c8158%2c10254>
6. Laitinen, J. Riistama, K. Vuori, M. 2005. Suomen kemianteollisuus. Tampere. Chemas Oy. 272 s. ISBN 952-9597-54-1.
7. Turveteollisuusliitto. Energiaturpeen laatuohje. 2006. Nettijulkaisu. Löytyy: http://www.turveteollisuusliitto.fi/user_files/files2/Energiaturpeen%20laatuohje%202006.pdf
8. <http://chemistry.umeche.maine.edu/~amar/fall2007/bomb.jpg>
9. Vapo. kuvapankki. Nettijulkaisu. 2005. Löytyy: <http://www.vapo.fi/fin/palvelut/viestintapalvelut/kuvapankki/?id=108&selClass=29>

10. Seppänen, R. Kervinen, M. Parkkila, I. Karkela, L. Meriläinen, P. 2006. MAOL taulukot. 2. painos. Keuruu. Otava. 167 s. ISBN 951-1-20607-9.
11. Hellgren, M. Heikkinen, L. Suomalainen, L. 1992. Energia ja ympäristö. Helsinki. VAPK-kustannus. 299 s. ISBN 951-37-0930-2.
12. Suomen standardoimisliitto. Standardi SFS-EN ISO 1716. Reaction to fire test for building products. Determination of the heat of combustion. Helsinki. 2002. 30s.
13. Antila, A-M. Karppinen, M. Leskelä, M. Mölsä, H. Pohjakallio, M. 2005. Tekniikan kemia. 7.-8. painos. Helsinki. Edita. 303 s. ISBN 951-37-3738-1.
14. Tuominen, A. 2007. Rypsiöljyn tuotanto ja käyttö bioenergiana maatilalla. Laurea Ammattikorkeakoulu. Hyvinkää. Saatavissa: <http://rulab.laurea.fi/loppuraportti.pdf>
15. Suomen Kasviöljykierrätys Oy. Metso Teräketjuöljy. Käyttöturvallisuustiedote. 2003. Loimaa. Saatavissa: <http://ekooil.com/word/Metsoteraketjuoljy.doc>

MITTAUSPÖYTÄKIRJAT

Taulukko 4 Kopiopaperin mittauspöytäkirja.

Aine : Kopiopaperi		
	Massa (g)	Palamislämpö (J/g)
Näyte 1	0,5050	11 934
Näyte 2	0,4980	11 934
Näyte 3	0,4910	12 002
Keskiarvo:		11 957
Tuhkapitoisuus:	16,8 %	

Taulukko 5 Aikakauslehden kannen mittauspöytäkirja.

Aine : Aikakauslehden kansi		
	Massa (g)	Palamislämpö (J/g)
Näyte 1	0,4792	9 850
Näyte 2	0,5271	10 012
Näyte 3	0,5012	9 919
Keskiarvo:		9 927
Tuhkapitoisuus:	26,9 %	

Taulukko 6 Puuhakkeen mittauspöytäkirja.

Aine : Puuhake		
	Massa (g)	Palamislämpö (J/g)
Näyte 1	0,5100	18 947
Näyte 2	0,4982	18 944
Näyte 3	0,4897	19 178
Keskiarvo:		19 023
Tuhkapitoisuus:	0,25 %	

Taulukko 7 Pellavarouheen mittauspöytäkirja.

Aine : Pellavarouhe		
	Massa (g)	Palamislämpö (J/g)
Näyte 1	0,5005	21 855
Näyte 2	0,4993	21 927
Näyte 3	0,4848	21 662
Keskiarvo:		21 818
Tuhkapitoisuus:	2,5 %	

Taulukko 8 Selluloosan mittauspöytäkirja.

Aine : Selluloosa		
	Massa (g)	Palamislämpö (J/g)
Näyte 1	0,5236	16 207
Näyte 2	0,5113	16 369
Näyte 3	0,4921	16 305
Keskiarvo:		16 294
Tuhkapitoisuus:	0,9 %	

Taulukko 9 Mäntyöljyn mittauspöytäkirja.

Aine : Mäntyöljy		
	Massa (g)	Palamislämpö (J/g)
Näyte 1	0,5009	39 163
Näyte 2	0,4955	39 077
Näyte 3	0,5037	38 976
Keskiarvo:		39 072
Tuhkapitoisuus:	0,4 %	

Taulukko 10 Rypsiöljyn mittauspöytäkirja.

Aine : Rypsiöljy		
	Massa (g)	Palamislämpö (J/g)
Näyte 1	0,5169	39 466
Näyte 2	0,4858	39 614
Näyte 3	0,4973	38 561
Keskiarvo:		39 214
Tuhkapitoisuus:	0,2 %	

Taulukko 11 Aktiivihiilen mittauspöytäkirja.

Aine : Aktiivihiili		
	Massa (g)	Palamislämpö (J/g)
Näyte 1	0,5003	31 010
Näyte 2	0,4917	31 055
Näyte 3	0,4895	31 065
Keskiarvo:		31 043
Tuhkapitoisuus:	3,7 %	

Taulukko 12 Moottoribensiinin mittauspöytäkirja.

Aine : Moottoribensiini		
	Massa (g)	Palamislämpö (J/g)
Näyte 1	0,5025	45 719
Näyte 2	0,5130	45 250
Näyte 3	0,5080	46 240
Keskiarvo:		45 736
Tuhkapitoisuus:	0,2 %	

Taulukko 13 Etanolin mittauspöytäkirja.

Aine : Etanoli (99,5 p-%)		
	Massa (g)	Palamislämpö (J/g)
Näyte 1	0,5135	28 569
Näyte 2	0,4880	26 460
Näyte 3	0,4980	28 788
Keskiarvo:		27 939
Tuhkapitoisuus:	0,2 %	

Taulukko 14 Glyserolin mittauspöytäkirja.

Aine : Glyseroli (99,5 p-%)		
	Massa (g)	Palamislämpö (J/g)
Näyte 1	0,5056	17 746
Näyte 2	0,5013	17 759
Näyte 3	0,4957	17 735
Keskiarvo:		17 747
Tuhkapitoisuus:	0,1 %	

Taulukko 15 Moottoriöljyn mittauspöytäkirja.

Aine : Moottoriöljy		
	Massa (g)	Palamislämpö (J/g)
Näyte 1	0,5005	44 562
Näyte 2	0,5110	44 702
Näyte 3	0,5115	44 700
Keskiarvo:		44 654
Tuhkapitoisuus:	1,6 %	

Taulukko 16 Koivutuohen mittauspöytäkirja.

Aine : Koivutuohi		
	Massa (g)	Palamislämpö (J/g)
Näyte 1	0,5164	33 048
Näyte 2	0,4963	33 082
Näyte 3	0,5012	33 329
Keskiarvo:		33 153
Tuhkapitoisuus:	0,4 %	

Taulukko 17 Puupelletin mittauspöytäkirja.

Aine : Puupelletti		
	Massa (g)	Palamislämpö (J/g)
Näyte 1	0,4975	18 792
Näyte 2	0,4746	18 752
Näyte 3	0,5076	18 957
Keskiarvo:		18 834
Tuhkapitoisuus:	0,3 %	

Taulukko 18 Glukoosin mittauspöytäkirja.

Aine : Glukoosi		
	Massa (g)	Palamislämpö (J/g)
Näyte 1	0,4973	15 338
Näyte 2	0,4968	15 702
Näyte 3	0,5100	15 415
Keskiarvo:		15 485
Tuhkapitoisuus:	0,6 %	

Taulukko 19 Männytkuoren mittauspöytäkirja.

Aine : Männytkuori		
	Massa (g)	Palamislämpö (J/g)
Näyte 1	0,5053	18 733
Näyte 2	0,4935	19 394
Näyte 3	0,5158	18 713
Keskiarvo:		18 947
Tuhkapitoisuus:	1,5 %	

Taulukko 20 Biodieselin mittauspöytäkirja.

Aine : Biodiesel (RME)		
	Massa (g)	Palamislämpö (J/g)
Näyte 1	0,5008	40 054
Näyte 2	0,5043	39 547
Näyte 3	0,5039	40 595
Keskiarvo:		40 065
Tuhkapitoisuus:	0,3 %	

Taulukko 21 Tuoreen puun mittauspöytäkirja.

Aine : Tuore puu		
	Massa (g)	Palamislämpö (J/g)
Näyte 1	0,9968	9 849
Näyte 2	1,0243	9 865
Näyte 3	0,9877	9 958
Keskiarvo:		9 891
Tuhkapitoisuus:	0,4 %	

Taulukko 22 24 h kuivuneen puun mittauspöytäkirja.

Aine : 24 h kuivunut puu		
	Massa (g)	Palamislämpö (J/g)
Näyte 1	1,0043	14 915
Näyte 2	1,0067	14 196
Näyte 3	1,1069	14 977
Keskiarvo:		14 696
Tuhkapitoisuus:	0,4 %	

Taulukko 23 7 vuorokautta kuivuneen puun mittauspöytäkirja.

Aine : 7 vrk kuivunut puu		
	Massa (g)	Palamislämpö (J/g)
Näyte 1	0,4885	18 805
Näyte 2	0,4960	18 700
Näyte 3	0,5053	18 610
Keskiarvo:		18 705
Tuhkapitoisuus:	0,7 %	

Taulukko 24 Turpeen mittauspöytäkirja.

Aine : Turve		
	Massa (g)	Palamislämpö (J/g)
Näyte 1	0,5267	12 703
Näyte 2	0,5082	13 138
Näyte 3	0,4877	12 602
Keskiarvo:		12 814
Tuhkapitoisuus:	1,5 %	

Taulukko 25 Puun oksan mittauspöytäkirja.

Aine : Puun oksa		
	Massa (g)	Palamislämpö (J/g)
Näyte 1	0,5665	18 964
Näyte 2	0,5027	18 825
Näyte 3	0,5068	18 869
Keskiarvo:		18 886
Tuhkapitoisuus:	0,3 %	